膨胀土路基隆起变形对无砟轨道的影响及控制措施

冯文清　何长青

中铁二院工程集团有限责任公司　四川　成都　610036

摘　要：膨胀土富含亲水性矿物，具有吸水膨胀、失水收缩及裂隙发育等特性，湿度、温度与地下水动态耦合作用诱发路基隆起变形，其发展呈现初始吸水、应力重分布至稳定的阶段性规律。隆起变形导致无砟轨道几何形位劣化，表现为纵向不平顺、横向偏移及竖向脱空，引发轨道板应力重分布、支承层剪切破坏及扣件系统失效，并在长期服役中产生疲劳损伤累积、刚度匹配失效与耐久性降低等性能退化问题。针对上述问题，变形控制技术体系涵盖湿度调控、地基改良与结构增强三大方向，通过主动隔水、被动保湿、排水优化控制水分场，采用物理置换、化学固化、生物改良改善土体性质，运用刚度匹配、变形协调与纵向约束提升结构抗力，形成系统的膨胀土路基无砟轨道变形控制方案。

关键词：膨胀土路；隆起变形；无砟轨道；控制措施

引言

膨胀土在全球范围内分布广泛，其显著的胀缩特性对基础设施建设构成严峻挑战。在铁路工程领域，膨胀土路基在环境水分变化条件下易发生不均匀隆起变形，直接威胁无砟轨道结构的平顺性、稳定性与长期服役性能。无砟轨道对下部基础的变形适应性要求极高，微小的路基差异变形即可引发轨道几何形位劣化，进而改变结构受力状态，加速疲劳损伤与性能退化。深入认识膨胀土路基的隆起变形机理，明确其对无砟轨道结构的力学影响规律，并建立系统有效的变形控制技术体系，是保障铁路线路安全运营的关键。

1 膨胀土路基特性与隆起变形机理

1.1 膨胀土的物理化学特性

膨胀土因其特殊的矿物组成与微观结构表现出显著的物理化学特性。土体中富含蒙脱石、伊利石等亲水性黏土矿物，这些矿物具有巨大的比表面积和强烈的表面吸附能力，晶层间存在可交换阳离子，使其对水分变化极为敏感。微观上，矿物颗粒呈片状或扁平状堆叠，形成微裂隙与孔隙交织的结构，为水分进出提供了通道。在干燥状态下，颗粒间通过基质吸力维持紧密排列；遇水时，矿物晶层间产生水化作用，引起晶格扩张与颗粒间距增大，表现为宏观的体积膨胀。此类土体还具有典型的裂隙性结构，干缩形成的裂隙网络不仅破坏了土体的整体性，更成为水分优先迁移的通道，加剧了水对深层土体的影响。

1.2 隆起变形触发条件

膨胀土路基的隆起变形是多种环境因素耦合作用的结果。湿度梯度变化是最直接的触发条件，降雨入渗使表层土体含水率迅速升高，产生非均匀的膨胀变形；而蒸发作用则导致表层失水收缩，形成干缩裂隙，为后续水分深入提供了通道，二者动态交替改变了土体的水分分布状态。温度场耦合效应同样不可忽视，温度变化引起土体内部热胀冷缩的同时，还影响水分的相变与迁移过程，温度的升高可加速水分蒸发，降低基质吸力，而温度降低则可能促使水汽凝结，改变土体含水量。地下水动态变化也是重要因素，毛细水上升使路基底部土体长期处于湿润状态，形成持续的膨胀推力；承压水头变化则可能引发深层土体的水分补给，使隆起变形范围向深度方向扩展。多种条件共同作用，构成了隆起变形的外部驱动机制。

1.3 变形发展过程

膨胀土路基隆起变形呈现出阶段性发展规律。初始吸水阶段，水分沿裂隙优先入渗，表层土体含水率急剧增加，产生显著的体积膨胀，膨胀作用首先在局部区域发生，形成微隆起区；随着膨胀应力增大，原有裂隙进一步扩展，新的裂隙同时产生，为水分继续向深层迁移创造条件。应力重分布阶段，由于土体膨胀的非均匀性，路基内部应力场发生显著调整，膨胀量较大的区域对周边土体产生挤压作用，促使侧向位移与剪应力集中，隆起变形由局部向区域扩展，变形形态逐渐呈现为非均匀分布，局部可能出现差异隆起[1]。进入稳定阶段后，土体含水量随环境条件趋于动态平衡，膨胀变形速率显著减缓，但土体内仍保留部分残余变形，该阶段土

体结构已发生不可逆的改变，即便后续水分条件再次变化，其变形特征也与初始状态有明显差异，表现为历史应力作用下的结构性响应。

2 对无砟轨道结构的力学影响

2.1 轨道几何形位劣化

膨胀土路基的隆起与差异变形直接引发无砟轨道几何形位的劣化，成为影响行车安全与舒适性的关键因素。纵向不平顺表现为相邻轨枕之间因路基不均匀膨胀或沉降而产生的高差累积效应，膨胀土在空间上的非均匀变形使得轨枕支撑条件出现差异，相邻轨枕的高程偏差沿线路方向不断叠加，形成波长显著的长波不平顺，这种不平顺难以通过常规扣件系统完全调整，对高速运行的车辆产生持续性的垂向激励。横向偏移体现为轨道中心线偏离设计位置，膨胀土侧向位移产生的水平推力作用于轨道结构，使轨道整体发生横向移动，中心线偏移量与方向角变化相互耦合，导致线路方向不良，增加了轮轨横向相互作用力。竖向隆起风险集中于基床表层与轨道板接触界面，当膨胀土路基产生向上的体积膨胀时，基床表层抬升而轨道板因自身刚度及上部约束未能同步变形，二者之间形成脱离间隙，破坏了轨道结构的连续支撑条件，脱空区域的存在使轨道板由均匀支撑变为间断支撑，显著改变了结构的边界约束状态，成为无砟轨道几何形位失稳的重要表现形式。

2.2 结构受力状态改变

膨胀土路基变形条件下无砟轨道结构的受力状态发生根本性改变，应力场重新分布后出现多处不利受力特征。轨道板应力重分布集中体现在板底脱空区域周边的应力集中现象，当基床表层与轨道板之间因路基不均匀变形产生局部脱空时，轨道板在列车荷载作用下的支撑条件由面支撑退化为点支撑或线支撑，脱空区域边缘产生显著的弯拉应力集中，峰值应力远超正常服役状态下的设计值，加速轨道板疲劳损伤的萌生与扩展。支承层剪切破坏主要发生于层间界面位置，膨胀土的水平位移与差异沉降使支承层承受超出设计水平的剪应力，层间界面抗剪强度不足时发生滑移变形，滑移累积至一定程度演变为错台，破坏结构的层间协同工作性能，导致上部轨道板与下部基础之间的传力路径发生畸变[2]。扣件系统失效表现为纵向阻力衰减与动态响应异常，路基变形改变了轨道结构与下部基础间的约束条件，扣件提供的纵向阻力因受力状态改变而降低，在温度力与列车动载的耦合作用下，轨道结构动态响应特征发生显著变异，局部区域出现过大的位移幅值与振动加速度，影响系统稳定性与扣件部件的使用寿命。

2.3 长期性能退化

在膨胀土路基持续变形与列车循环荷载长期耦合作用下，无砟轨道结构呈现出显著的长期性能退化特征。疲劳损伤累积表现为裂纹萌生、扩展与贯通的全过程，轨道板及支承层在反复的弯拉应力与剪应力作用下，内部微裂纹逐渐形成并沿薄弱界面扩展，裂纹密度与长度随服役时间增长而不断增加，裂纹贯通后将导致结构承载能力显著下降，最终可能引发结构断裂。刚度匹配失效体现在轨道系统各组成部分间的刚度协调关系被破坏，膨胀土路基的长期变形使下部基础刚度发生不可逆的改变，与轨道板、支承层、扣件等上部结构的刚度形成新的匹配关系，若刚度差异超出合理范围，将导致系统动力特性改变，加剧结构局部损伤与振动响应。耐久性降低涉及多物理场协同作用机制，氯离子侵蚀在结构出现裂纹后沿裂纹通道向内部渗透，加速钢筋锈蚀进程，锈蚀产物体积膨胀进一步加剧混凝土开裂；冻融循环作用使已劣化的混凝土结构内部孔隙水反复冻胀，损伤不断累积；二者相互促进，形成恶性循环，加速材料性能衰退与结构承载能力衰减，大幅缩短无砟轨道结构的使用寿命，增加运营期间的维护工作量与维修难度[3]。

3 变形控制技术体系

3.1 湿度调控技术

膨胀土路基变形控制以湿度调控为核心，通过主动隔水、被动保湿与排水优化三方面措施构建全链条水分管控体系。主动隔水致力于建立物理屏障阻断外部水源入侵，复合土工膜铺设于路基底部及边坡位置，利用其优良的防渗性能形成连续封闭面，有效阻隔大气降水与地表径流的下渗通道；垂直阻水帷幕设置于路基两侧或关键过渡段，采用高压喷射注浆或深层搅拌工艺形成连续墙体，深入至地下水位变动带以下，切断侧向地下水渗流路径，显著缩小受外界水分影响的路基范围。被动保湿着眼于维持土体含水量长期稳定，湿度调节层选用具有良好毛细阻断功能的粒状材料铺设在基床底部或路堤内部，通过改变土体与大气环境的接触界面，减缓水分蒸发与吸附的速率；毛细阻断结构利用材料级配特征破坏毛细水上升的连续性，抑制地下水沿土体孔隙向上迁移至路基工作区[4]。排水优化通过布设盲沟系统与横向排水管构建高效排水网络，盲沟内填充透水性材料形成汇水通道，汇集降雨入渗后在土体内形成的自由水，横向排水管按一定间距与盲沟连接，将汇集水流快速导出路基范围，降低土体含水率峰值与波动幅度，形成阻隔、维持、疏排协同作用的湿度调控体系。

3.2 地基改良技术

地基改良技术从根源上改变膨胀土的物理力学性质，通过物理置换、化学固化与生物加固三种途径降低土体膨胀潜力。物理改良采用砂石换填与级配优化方法，将膨胀性显著的土体挖除后置换为透水性良好且无膨胀变形的砂砾石材料，切断膨胀土在路基深度范围内的连续分布，从根本上消除膨胀变形来源；级配优化通过合理配置粗颗粒骨架与细颗粒填充的比例，减少土体毛细孔隙发育程度，降低水分迁移能力与体积变形敏感性。化学改良以石灰—水泥复合固化体系为主要手段，石灰掺入后发生离子交换与火山灰反应，降低土体亲水性矿物活性并改善颗粒间胶结状态，水泥水化产物进一步填充孔隙并形成骨架结构，复合体系中两者协同作用，使改良后土体同时具备较高的强度与优良的水稳定性，膨胀率与膨胀力均大幅降低。生物改良利用微生物矿化加固技术，向膨胀土中注入特定微生物菌液与营养盐溶液，诱导碳酸钙在土颗粒表面及接触点处析出并胶结，填充土体孔隙的同时增强颗粒间联结强度。

3.3 结构增强技术

结构增强技术通过优化路基结构设计并设置专用抗变形构件，提升路基抵抗与适应膨胀变形的能力。刚度匹配设计采用基床表层模量梯度控制方法，依据膨胀土变形在深度方向的分布规律，沿垂向合理配置不同模量的填筑材料，由下至上形成刚度渐变的过渡层，避免因相邻层位模量突变产生应力集中，使列车荷载与膨胀力在结构内部均匀传递，减小局部受力过大导致的损伤风险。变形协调构造通过设置滑动层与缓冲垫层实现，滑动层选用低摩擦系数的土工复合材料铺设于结构层之间，允许层间发生有限度的相对位移，有效释放膨胀变形产生的水平挤压应力；缓冲垫层采用具有一定压缩性的轻质材料，在垂向吸收部分膨胀变形量，减小传递至上部轨道结构的隆起位移与附加应力[5]。纵向约束体系采用抗隆起桩与地锚加固技术，抗隆起桩穿越膨胀土活动层深入至下部稳定持力层，利用桩体与桩周土体的相互作用抵抗土体膨胀产生的上拔力与水平推力；地锚系统按设计角度与间距布置于路基关键部位，通过锚固段与深层稳定地层的粘结力提供抗拔承载力，将路基锚固于下部稳定地层中，限制土体在湿度变化条件下的垂向与水平位移，形成多向约束的立体加固体系，有效控制路基整体变形与差异变形。

结束语：膨胀土路基的隆起变形是矿物特性与环境因素耦合作用的复杂过程，其发生发展具有显著的阶段性与空间非均匀性。此类变形对无砟轨道结构的影响贯穿几何形位、受力状态与长期性能多个层面，若不加以有效控制，将导致轨道结构损伤累积与服役性能持续劣化。构建系统化的变形控制技术体系，需从湿度调控、地基改良与结构增强三方面协同发力，形成涵盖源头阻断、土体改性、结构适应的综合解决方案。实际工程中，应根据具体的地质条件与环境特征，合理选择与组合各项技术措施，注重各环节之间的匹配性与协调性，以实现对膨胀土路基变形的有效约束。

参考文献

[1] 刘文广. 铁路工程中无砟轨道施工方法及要点控制 [J]. 住宅与房地产,2021(24):203-204.

[2] 黄峰. 轨道交通工程中的无砟轨道底座板施工技术 [J]. 低碳世界,2021,11(05):233-234.

[3] 冯磊. 地铁无砟轨道道床板混凝土裂缝成因及处理 [J]. 建筑技术开发,2021,48(07):121-123.

[4] 裴旻罡. 公路工程膨胀土路基施工关键技术 [J]. 交通世界,2024,(35):97-99.

[5] 饶志鹏. 公路工程膨胀土路基设计与施工要点分析 [J]. 运输经理世界,2024,(21):32-35.